

TARTU ÜLIKOOL  
MATEMAATIKA-INFORMAATIKATEADUSKOND  
Matemaatilise statistika instituut  
Matemaatilise statistika eriala

Maarja Bussov

**Universumi struktuuri statistiline uurimine:  
filamentide, galaktikate ja galaktikaparvede vahelised seosed**  
Magistritöö

Juhendajad: professor Kalev Pärna  
teadur Elmo Tempel, PhD

Tartu 2014

## **Universumi struktuuri statistiline uurimine: filamentide, galaktikate ja galaktikaparvede vahelised seosed**

Magistritöö matemaatilise statistika erialal

### **Lühikokkuvõte**

Antud töö viib lugeja kurssi universumi struktuuri ja selle elementidega. Kesken-  
dutakse galaktikate/galaktikaparvede jaotusele ning nende omavahelistele kau-  
gustele võrgustikku moodustavates filamentides. Peamised tulemused on, et ga-  
laktikad eelistavad kindlaid vahekauguseid ja galaktikaparvede paiknemisel ilm-  
neb selge perioodilisus. Samuti leitakse võimalike filamentide otstüüpide esine-  
missagedused. Tulemus näitas struktuuri keerukust ja filamentide võimalike ühen-  
dusviiside rohkust.

**Märksõnad:** matemaatiline statistika, galaktikaparved, universum, galaktika-  
süsteemid, suuremõõtmelised struktuurid, juhuslikud protsessid.

## **Statistical study of the structure of the Universe: relations between filaments, galaxies and galaxy groups**

Master's thesis in Mathematical Statistics

### **Abstract**

This thesis will familiarize the reader about the structure and elements of the Uni-  
verse. Analysis focuses on the distribution and distances of galaxies and of galaxy  
groups in filamentary cosmic-web structure. Main results were that along the fila-  
ments axis galaxies prefer a certain distance and that galaxy groups tend to have a  
regular pattern. The types of filament endpoints are also of interest. Observations  
show the complexity of the structure and that filaments connect to each other di-  
versely.

**Key words:** mathematical statistics, galaxy groups, Universe, galaxy systems,  
large-scale structure, random processes.

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>4</b>
<b>1 Universumi struktuur ja uurimisülesanded</b>	<b>5</b>
1.1 Universumi struktuur . . . . .	5
1.2 Universumi struktuuri elemendid . . . . .	6
Filamendid . . . . .	6
Galaktikagrupid ja parved . . . . .	7
Tühikud . . . . .	8
1.3 Andmed . . . . .	8
Filamendi teljepunktide andmestik A2 . . . . .	9
Galaktikate andmestik A3 . . . . .	9
1.4 Uurimisülesanded . . . . .	10
1. Galaktikate paiknemine piki filamendi telge. . . . .	10
2. Galaktikaparvede paiknemine piki filamendi telge. . . . .	10
3. Filamentide otsatüüpide uurimine. . . . .	11
<b>2 Galaktikate paiknemine piki filamendi telge</b>	<b>12</b>
2.1 Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	12
2.2 Meetodid . . . . .	15
Korrelatsioonifunktsiooni hindamine . . . . .	15
Jackknife meetod . . . . .	16
2.3 Tulemused . . . . .	17
Galaktikate paiknemine . . . . .	17
Vaadeldava galaktika naabergalaktikate kaugused . . . . .	18
Filamendi kõikide galaktikate vahelised kaugused . . . . .	20

<b>3 Galaktikaparvede paiknemine piki filamendi</b>	<b>25</b>
<b>telge</b>	<b>25</b>
3.1 Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	25
3.2 Meetodid . . . . .	26
Korrelatsioonifunktsiooni hindamine . . . . .	26
Jackknife meetod . . . . .	26
3.3 Tulemused . . . . .	26
Parvede paiknemine . . . . .	26
Vaadeldava parve naaberparvede kaugused . . . . .	27
Filamendi kõikide galaktikaparvede vahelised kaugused . . . . .	29
<b>4 Filamentide otsatüüpide uurimine</b>	<b>34</b>
4.1 Filamendi otspunkti ümber paiknevad galaktikaparved . . . . .	34
Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	34
Tulemused . . . . .	35
4.2 Filamendi otspunkti ümber paiknevad teiste filamentide otspunktid	36
Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	36
Tulemused . . . . .	37
4.3 Filamentide otspunktidest mööduvad filamendid . . . . .	38
Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	38
Tulemused . . . . .	39
4.4 Filamendi otspunkti juures asuvad teised filamendid . . . . .	40
Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine . . . . .	40
Tulemused . . . . .	40
<b>5 Kokkuvõte</b>	<b>43</b>
<b>Kasutatud kirjandus</b>	<b>45</b>

## Sissejuhatus

Aastal 1978 avaldasid Tartu Observatooriumi teadlased Mihkel Jõeveer ja Jaan Einasto uurimistöö, milles väideti, et universumil on rakuline struktuur. See struktuur koosneb galaktikatest, mis jaotuvad universumis erinevateks süsteemideks. Osad neist on pikad looklevad kogumid ja teised struktuurielemendid on kompaktsed ja tihedad.

Käesolev magistritöö uurib peamiselt neid pikkasid lõpmatuid alasid katvaid galaktikatest moodustatud kõveraaid sildasid, mida nimetatakse *filamentideks*.

Töö sisu on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis tutvustatakse universumi struktuuri põhilisi komponente, milledeks on filamendid, galaktikate parved ja grupid ning tühikud. Teises peatükis uuritakse filamenti moodustavate galaktikate paiknemist. Eesmärk on teada saada, kas galaktikad on piki filamenti jaotunud ühtlaselt või leidub seal mingi muu seaduspära. Kolmandas peatükis vaadeldakse mitmest galaktikast moodustatud parve paiknemist ja eelistusi selles samas süsteemis. Eesmärk on teada saada, kas galaktikaparved on piki filamendi telge jaotunud ühtlaselt või leidub seal mingi muu seaduspära. Neljandas peatükis on fookuse all filamentide otspunktid. Eesmärgiks on leida erinevate otspunktitüüpide esinemissagedused vaadeldavas universumis. Lisaks eelpool mainitule on käesoleva töö üheks sihiks saada kinnitust vaatluse all olevate filamentide leidmise meetodile (*Markovi ahelate Monte Carlo meetod*).

Andmete analüüsimiseks on antud töös kasutatud *R*-tarkvara.

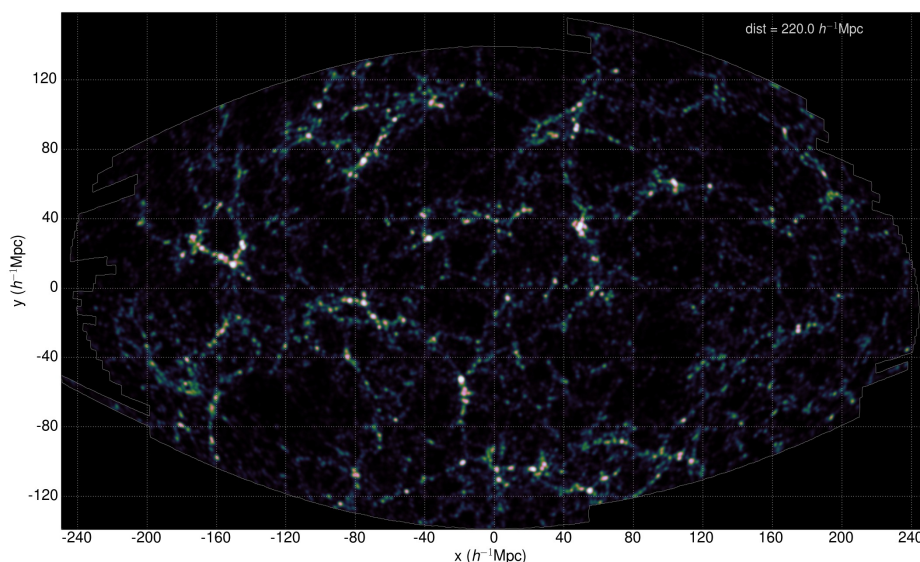
Autor tänab professor Kalev Pärnat arvukate paranduste ja töö struktuuri puudutavate ettepanekute eest. Samuti tänab autor Tartu Observatooriumi teadurit Elmo Tempelit abi eest andmete analüüsimisel, paljude paranduste ja huvitava uurimisteema eest.

# 1 Universumi struktuur ja uurimisülesanded

## 1.1 Universumi struktuur

Järgnev lühiülevaade põhineb raamatul [2] ja artiklil [1].

Universumi struktuur on intrigeeriv ja silmatorkav nähtus. Esialgsed uuringud väitsid, et universumil on rakuline struktuur, mis on tuntud kosmilise võrgustiku nime all [3]. Hiljuti aset leidnud uuringud nagu *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* ([2] lk. 33) on neid arvamusi kinnitanud. Suured kohalikku universumi kirjeldavad 3-mõõtmelised kaardid paljastasid uskumatult rikka ja keeruka kosmose. Esile tõusis keerukas filament-struktuur. Nende suurte mustrite kirjeldamiseks kasutatakse mitmeid erinevaid väljendeid nagu rakuline struktuur, käsna moodi topoloogia, vahu moodi mullid, mida ümbritsevad filamendid ning galaktikatest moodustatud seinad. Kõik need väljendid on enam-vähem sobivad kosmilise struktuuri kvalitatiivseks kirjeldamiseks galaktikate jaotuse abil.



Joonis 1. Universumi struktuur. Autor: Juhan Liivamägi

Kosmilise struktuuri elementide kirjeldamine ja tundmaõppimine on võtmete-

guriteks terviku mõistmisel. Nad sisaldavad infot struktuuride kujunemise füüsika kohta ning on rikkad allikad terve kosmose mõistmiseks.

Joonis 1 on illustreeriv pilt universumist. Pilt on tehtud kasutades SDSS andmeid ning katab umbes 17% kogu taevast. On näha filament-võrgustikku, heledaid galaktikagruppe sõlmpunktides ja suuri tühjemaide/tumedamaide alasid. Järgnevas kirjeldame lühidalt neid universumi peamisi struktuurielemente.

## 1.2 Universumi struktuuri elemendid

### Filamendid

Siinne kirjeldus põhineb artiklidel [1], [4] ja [5].

Varajased katsed kaardistada suureskaalalist galaktikate jaotust universumis näitasid, et galaktikad ei paikne ruumis kaugeltki ühtlaselt. Hoopis vastupidi galaktikate massi/heleduse jaotus moodustab keerukaid ja kompaktseid süsteeme, mida seovad omakorda pikki sildasid meenutavad struktuurid, mida nimetatakse *filamentideks*. Filamendid on ümbritsetud üllatavalt suurte tühjade piirkondadega. Filamentide pikkused on vägagi erinevad, kõikides mõnest kuni sadade megaparsekiteni ( $1\text{Mpc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ valgusaastat}$ ). Galaktikate kaardid on visuaalselt just nende struktuurielementide poolt domineeritud. Enamasti sisustavad filamendid kosmilist ruumi galaktikatest moodustatud gruppide vahel, kuid neid leidub ka tühikutes. Galaktikate gruppe siduvad filamendid erinevad teineteisest järgnevalt:

**sirged filamendid** - asuvad kahte galaktikagruppi ühendava telje suhtes tsentris;

**nihkes filamendid** - suhteliselt sirged filamendid, kuid nad ei ühti galaktikagruppe ühendava teljega;

**viltused või ebaregulaarsed filamendid** - enamus filamente on just sellised. Nad ei ole sirged, vaid on enamjaolt viltused või koosnevad mitmest erinevast osast. Viltused filamendid annavad märku lähedal asuvast galaktikate grupist.

Need sildasid meenutavad struktuurid sisaldavad endas mõõtmataid mustreid ja hiiglaslikke seinasid meenutavaid struktuure nagu *Coma Great Wall* ja *Sloan Great Wall*, mille läbimõõduks on  $400h^{-1}Mpc$ . Suurus  $h$  on Hubble konstandi juures olev suurus, kui Hubble konstant on kujul  $H = h \cdot 100 \frac{km}{s} Mpc^{-1}$ .

### **Galaktikagrupid ja parved**

Järgnev ülevaade põhineb raamatul [2] (lk. 34).

Isoleeritud galaktikaid leidub harva. Galaktikad asuvad enamasti parvedes või gruppides, mis omakorda moodustavad suuremate struktuuride elemente. Meie galaktika asub nn. Kohalikus Grupis. See on umbes 30' *st* liikmest moodustunud gravitatsiooniliselt seotud galaktikate süsteem. Kolm spiraalgalaktikat domineerivad gruppi: Andromeeda galaktika, M33 ja Linnutee. Peaaegu kõik Kohalikku Gruppi kuuluvad galaktikad asuvad  $1h^{-1}Mpc$  suuruses sfääris. Üldiselt sisaldavad galaktikate grupid vähem kui 50 liiget, millest enamuse moodustavad nõrgemad kääbusgalaktikad ning spiraalgalaktikad. Erandiks on väga tihedad ja kompaktsed liidud, mis sisaldavad ka suurel hulgal elliptilisi galaktikaid.

Galaktikate grupid on suuremad süsteemid, sisaldades sfääris raadiusega  $4h^{-1}Mpc$  50nd kuni mitut tuhandet liiget. Nad sisaldavad igat tüüpi galaktikaid. Mõned grupid on hästi defineeritud sfäärilise kujuga, teised aga ebaregulaarsemad. Samuti on võimalik leida alamstruktuure suuremas grupis. Üks näide ebaregulaarsest süsteemist on Virgo grupp, mille raadius on  $11h^{-1}Mpc$ . Meie galaktika on osa Virgo süsteemi harust. Virgo grupis on selgelt näha elliptiliste ja spiraalsete galaktikate morfoloogiline segregatsioon. Keskmise osa on sisutatud peamiselt



elliptiliste galaktikate poolt. Spiraalid on jaotunud tuuma ümber kui halo.

Universumi ainekond paikneb ligikaudu 17% nendes struktuurides. See aine on mahutatud universumi ruumis kõigest 0.4 protsenti (artikkel [6]).

## Tühikud

Galaktikad ääristavad eelistatult ümmargusi peaaegu tühje piirkondi, mida nimetatakse *tühikuteks* (ingl.k. *voids*) ([2] lk. 39). Esimene selline suur regioon, milles ei leitud peaaegu ühtegi galaktikat, on tuntud kui Boötes'e tühik, täites  $75h^{-1}Mpc$  läbimõõduga ala universumis. Tühikud on enamjaolt sfäärilised.

## 1.3 Andmed

Käesoleva töö empiiriline osa põhineb *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* andmete najal moodustatud andmebaasil [1]. Vaatluse all olevad filamendid on leitud märgitud-punktprotsessi abil (*Bisous mudel*). See loob filament-võrgustikku juhuslikke, üksteise peale ehitatud lõike konfigureerides.

Meid huvitavateks struktuurideks on filamendid, galaktikate parved ja galaktikad. Igale filamendile on loodud telg, mis asetseb piki struktuuri keset. Vaadeldavale teljele on kujutatud iga  $0.5h^{-1}Mpc$  tagant arvestuslikud koordinaatpunktid  $(1, 2, 3, \dots)$ . Vaatluse all on vaatelejust  $100h^{-1}Mpc$  kuni  $250h^{-1}Mpc$  kaugusel olevad objektid. Vastavalt ülalnimetatud kolmele struktuurile on uurimise all 2 andmestikku:

- filamentide teljepunktide andmestik A2,
- galaktikate andmestik A3.

## Filamendi teljepunktide andmestik A2

Andmestik sisaldab 275599 rida, millest igaüks iseloomustab vaadeldud ruumis filamendi teljel defineeritud arvestuslikku punkti. Maksimaalne punktide arv filamendil on 128 ning minimaalne 5. Analüüsi käigus vajalikud tunnused on:

**id** - filamendi identifikaator,

**idpts** - filamendi punkti identifikaator,

**npts** - filamendile, millel see punkt asub, kujutatud punktide koguarv,

**len** - filamendi pikkus ( $h^{-1} Mpc$ ),

**x, y, z**- punkti koordinaadid ruumis,

**dist** - punkti kaugus vaatlejast.

## Galaktikate andmestik A3

Andmestik sisaldab infot vaadeldud Universumis paikneva 576493 galaktika kohta. Analüüsi käigus vajalikud tunnused on:

**id** - galaktika identifikaator,

**nrich** - galaktikaparve rikkus (arvukus), millesse galaktika kuulub,

**fil\_dist**- galaktika kaugus filamendi teljest või otspunktist pikendatud teljest,

**fil\_id** - filamendi identifikaator, kuhu see galaktika kuulub,

**fil\_idpts** - galaktikale lähima filamendi teljepunkti identifikaator,

**dist\_fil\_end** - galaktika kaugus filamendi otspunktist piki filamendi telge, kui punkt asub väljaspool filamenti, mujal on väärtus 0,

$x, y, z$  - koordinaadid ruumis,

**rank** - galaktika tähtsusaste. Igas grupis on galaktikad järjestatud heleduse järgi, nii et kõige heledama galaktika  $rank = 1$ .

## 1.4 Uurimisülesanded

Antud töös pakub meile huvi vaatelejast (meist)  $100h^{-1}Mpc$  kuni  $250h^{-1}Mpc$  kaugusel olevad filamendid ja galaktikate parved. See on kauguste vahemik, milles filamentide ja galaktikate ruumiline tihedus on kõige mõistlikum antud analüüsi tarbeks. Töös otsitakse vastuseid järgmistele uurimisprobleemidele.

### 1. Galaktikate paiknemine piki filamendi telge.

Esialgu uuritakse loodud teljepunktide ümber asuvate galaktikate arvu jaotust. Seejärel on fookuse all filamendi teljele projekteeritud galaktikate vahelised kaugused. Huvi pakub see, kas omades ühte lähedal/kaugel asuvat naabergalaktikat asub teisel pool olev naaber samuti lähedal/kaugel. Teiseks püütakse välja selgitada, kas galaktikate vahelised kaugused jaotuvad kui ühtlase jaotusega juhuslike punktide vahelised kaugused.

### 2. Galaktikaparvede paiknemine piki filamendi telge.

Esiteks on fookuse all galaktikaparvede arvu jaotus mööda filamendi teljepunkte. Järgmisena vaadeldakse filamendi teljele projekteeritud galaktikaparvede vahelisi kaugusi. Sarnaselt eelnevale punktile uuritakse naaberparvede kaugusi vaadeldavast parvest. Samuti kontrollitakse, kas parvede vahelised kaugused jaotuvad kui ühtlase jaotusega juhuslike punktide vahelised kaugused.

### 3. Filamentide otsatüüpide uurimine.

Vaadeldakse filamente, mille mõlemad otspunktid jäävad valitud piirkonda. Tähelepanu all on filamentide otspunktide ümber konstrueeritud  $1h^{-1}Mpc$  ja  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega ruumi-kerad. Esiteks pakub huvi sinna sattuvate galaktikaparvede rikkus (arvukus). Teiseks pakub huvi filamentide jaotus nende otspunktide ümber loodud keraesse sattuvate teiste otspunktide arvu järgi. Kolmandaks pakub huvi filamentide jaotus nende otspunktide ümber olevat ruumi-kera läbivate filamentide arvu järgi. Viimasena kirjeldame filamendi otspunkti korral sellele etteantud valitud läheduses olevaid filamente.

## 2 Galaktikate paiknemine piki filamendi telge

Antud peatükis selgitame välja filamendi teljest  $0.5h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvate galaktika paiknemise piki filamendi telge. Sellised galaktikad moodustavad kõvera "toru" filamendi telje ümber ning ei kaasa kõiki antud filamenti kuuluvaid galaktikaid. Seejärel on fookuse all võimalik statistiline seos kahe naaberkauguse vahel, mis on võetud galaktikast tema vasakpoolse ja parempoolse naabergalaktikani. Lõpuks vaadeldakse kõikide galaktikate vahelisi kaugusi piki filamendi telge ja võrreldakse seda ühtlase jaotuse korral esinevate kaugustega.

### 2.1 Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine

Andmestik A2 sisaldab infot 275599 punkti kohta, mis asetsevad universumi ruumis kujutatud filamentide telgedel. Huvi pakuvad vaatelejast  $100h^{-1}Mpc$  kuni  $250h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvad filamendid. Arvesse võtame filamendid, millel vähemalt üks punkt asub selles vahemikus. Pärast andmestiku lõikamist näeme, et seda tingimust täidab 8568 filamenti, mis omavad kokku 153960 punkti. Kasutades saadavaid filamentide identifikaatoreid (*id*) valime välja sobivasse filamenti kuuluvad galaktikad (andmestikust A3), mida on kokku 198861. Huvi pakuvad galaktikad, mis asuvad filamendi teljest maksimaalselt  $0.5h^{-1}Mpc$  kaugusel. Seda tingimust täidab 66785 galaktikat. Järgnevalt vaatleme galaktikaid, mis ei asu filamendi telje ümber vaid otspunkti lähistel. Nende hulgast jätame alles üksnes otspunktidest maksimaalselt  $0.25h^{-1}Mpc$  kaugusel olevad galaktikad. Andmestikku A3 on jäänud 64805 galaktikat. Huvi pakuvad vähemalt  $30h^{-1}Mpc$  pikkused filamendid, mida on 165 ning need sisaldavad 5193 sobivat galaktikat. Viimase valiku tulemusena on pikima filamendi pikkuseks 114 punkti ning lühima filamendi pikkuseks 60 punkti.

Kuna filamentide alguspunktiks võib lugeda ükskõik kumba otspunkti, siis

vaatleme järgnevalt igat filamenti kaks korda, alustades mõlemast otspunktist. Täpsemalt loeme filamendi mõlemast otsast alates 60 punkti ning nimetame saadud osad eraldiseisvateks filamentideks. See tähendab, et täpselt 60. punkti omav filament on andmestikku loetud nüüd kaks korda, ühel neist on alguspunktiks teise viimane punkt. Pikemad filamendid aga lõigatakse katki pärast 60 punkti lugemist ja siis alustatakse lugemist teisest otsast. Selle tagajärjel on galaktikate andmestikus  $165 \cdot 2 = 330$  uue filamendi andmed. Alguspunktist loetuna moodustatud  $30h^{-1}Mpc$  pikkuste filamentide valitud ümbruses paikneb 4403 galaktikat ning teisest otsast loetute juurde kuulub 4378 galaktikat. Saadud andmestikku kasutatakse filamendi telje soovitud ümbruses olevate galaktikate paiknemise välja selgitamiseks (vt. alapeatükk 2.3).

Galaktikate omavaheliste kauguste analüüsis on ainult need galaktikad, mis asuvad filamendi telje kohal, üle otspunkti olevad visatakse välja. Selliseid galaktikaid on 8727. Kasutatavas galaktikate andmestikus (vt. 1.3) ei ole antud tunnus, mis näitaks galaktikate kauguseid teineteisest piki filamendi telge. Hetkel on teada galaktikate kaugused teljest (*fil\_dist*). Vajalik on projekteerida nad teljele. Filamendi teljele projekteeritud galaktikate vaheliste kauguste juures pakub huvi leida seal esinevaid võimalikke seaduspärasusi. Samuti pakub huvi vaadelda va galaktika naabrite kaugused. Nendele küsimustele vastuste leidmiseks luuakse andmestikku järgnevad uued tunnused:

1. Galaktika  $j$  koordinaatide  $(x_{g_j}, y_{g_j}, z_{g_j})$  ja temale lähima filamendi punkti  $k$  koordinaatide  $(x_{f_k}, y_{f_k}, z_{f_k})$  abil leitakse nendevaheline kaugus. Selleks kasutatakse valemit:

$$dist(galaktika_j, punkt_k) = [(x_{g_j} - x_{f_k})^2 + (y_{g_j} - y_{f_k})^2 + (z_{g_j} - z_{f_k})^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.1)$$

2. Hetkel on teada galaktika kaugus teljest (*fil\_dist*) ja tema kaugus lähimast

teljepunktist (valem (2.1) abil leitud). Rakendades Pythagorase teoreemi eelpool mainitud tunnustele, leitakse galaktika kaugus temale lähimast teljepunktist piki filamendi telge (*galtelg*).

3. Galaktika võib asuda lähimast teljepunktist  $k$  nii paremal kui vasemal pool. Selle väljaselgitamiseks võrreldakse galaktika kaugusi naaberpunktist  $k - 1$  ja  $k + 1$  (vt. valem (2.1)). Väiksem kaugus näitab galaktika projektsiooni paiknemist punktist  $k$  kas paremal või vasakul.

4. Järgnevalt luuakse uus tunnus, mis omab kahte väärtust:

$$kood = \begin{cases} -1, & \text{kui galaktika asub oma teljepunktist } k \text{ vasakul,} \\ +1, & \text{kui galaktika asub oma teljepunktist } k \text{ paremal.} \end{cases} \quad (2.2)$$

5. Järgmisena leitakse galaktika kaugus otpunktiks, selleks luuakse valem

$$galkaugused = (\text{lähimpunkt} - 1) \cdot 0.5 + kood \cdot galtelg, \quad (2.3)$$

kus suurus 0.5 on kahe punkti vaheline kaugus.

6. Lahutades teineteisest galaktikate kaugused otpunktidest (*galkaugused*) leitakse galaktikate kaugused naabergalaktikatest, saadakse tunnus *galgalkaug*.
7. Tunnuse *galkaugused* abil leitakse iga filamendi raames iga galaktika kaugus kõikidest sellel filamendil asuvatest galaktikatest. Andmed on vektoris nimega *suurvektor*.

Analüüsis kasutatakse igale filamendile projekteeritud galaktikate omavahelisi kauguseid ja vaadeldavate galaktikate naabrite kauguseid eraldi.

## 2.2 Meetodid

### Korrelatsioonifunktsiooni hindamine

Kosmoloogid kasutavad järgnevat filosoofilist üldistust. Igal ajahetkel näeb vaatlejale tavapärasel galaktikal keskmine suureskaalaline universum välja homogeenne (igast asukohast vaadatuna samasugune) ja isotroopne (samasugune igas suunas). Eeldust, et universum paistab samasugusena kõikidele vaatlejatele igal ajahetkel nimetatakse *kosmoloogia printsiibiks* ([7] lk. 355).

Järgnev esitus põhineb artiklil [8]. Uurides statistiliselt universumi suureskaalalist struktuuri, eeldatakse, et kolmemõõtmeline galaktikate punktide muster on valim statsionaarsest ja isotroopsest punktihulgast. Sellise punktide välja intensiivsus  $\lambda$  on esimest järku karakteristik,  $\lambda$  võrdub keskmise punktide arvuga ühikruumi kohta. Teist järku karakteristikud on *korrelatsioonifunktsioon*  $\xi(r)$  ja *paaris-korrelatsioonifunktsioon*  $g(r)$ , millede vaheline seos on järgmine:

$$g(r) = \xi(r) + 1. \quad (2.4)$$

Funktisooni  $g(r)$  defineeritakse järgnevalt. Olgu  $B$  lõpmatult väike kera ruumalaga  $dV$ . Tõenäosus, et punktide väljas üks punkt asub kera  $B$  on  $\lambda dV$ . Juhul kui on kaks palli  $B_1$  ja  $B_2$  ruumaladega vastavalt  $dV_1$  ja  $dV_2$  ja tsentrite vahelise kaugusega  $r$ , siis tähistagu  $P(r)$  tõenäosust, et punkt leidub mõlemas kera korraga. See tõenäosus avaldub järgnevalt:

$$P(r) = g(r)\lambda^2 dV_1 dV_2,$$

kus võrdeteguriks olevat suurust  $g(r)$ , nimetatakse *paaris-korrelatsioonifunktsiooniks*.

Punktide ühtlase jaotuse (Poissoni protsess) korral  $g(r) = 1$ .

Vaadeldes filamendile projekteeritud galaktikaid kui sõlmesid, näitab korrelatsioonifunktsioon  $\xi(r)$  tõenäosust leida vaadeldavast sõlmest kaugusel  $r$  naabersõlme. Järgnevalt on toodud üks võimalus selle suuruse hindamiseks ([2] lk. 81).



**Definitsioon 2.1.** *Davis ja Peebles hinnang korrelatsioonifunktsioonile  $\xi(r)$  on antud võrdusega*

$$\hat{\xi}(r)_{DP} = \frac{N_{rd}}{N} \cdot \frac{DD(r)}{DR(r)} - 1, \quad (2.5)$$

*kus*

*$N$  on vaadeldavas andmestikus (aknas  $W$ ) olevate punktide arv,*

*$N_{rd}$  on aknasse  $W$  ühtlase jaotusega juhuslikult genereeritud punktide arv,*

*suurus  $DD(r)$  on andmestikus (aknas  $W$ ) olevate paaride arv, mis asuvad teineteisest kaugusel  $[r, r + dr]$ ,*

*suurus  $DR(r)$  on andmestiku ning ühtlasest jaotusest genereeritud punktide vaheliste paaride arv aknas  $W$ , mis asuvad teineteisest kaugusel  $[r, r + dr]$ .*

### **Jackknife meetod**

Järgnev ülevaade Jackknife meetodist baseerub raamatul [9] (lk. 138).

Jackknife meetod annab võimaluse leida nihke standardhälbe hinnang, mis arvestab andmetes peituvat struktuuri ja lisaks sellele konstrueerida ligikaudne usaldusvahemik  $g(r, r+dr)$  jaoks. Üldidee seisneb selles, et ühest valimist moodustatakse palju valimeid ( $K$  tükki) teatud eeskirja kohaselt, iga kord arvutatakse meid huvitavad hinnangud ja nende põhjal saadakse lähend hinnangut määrava statistiku jaotusele. Jackknife meetodi skeem on järgmine:

1. Arvutame valimist huvipakkuva karakteristiku hinnangu  $\hat{g}_u(r, r + dr)$
2. Jagame valimi  $K$  rühmaks, rühmade arv on antud juhul filamentide arv. Kordame kõiki arvutusi  $K$  korda, jättes iga kord valimist ühe rühma (filamenti) välja. Olgu  $\hat{g}_{(j)}$  huvitava statistiku hinnang, kui  $j$ -s rühm (filament) on valimist välja jäetud.
3. Toome sisse ja arvutame nn. *pesudoväärtused*

$$g_{*j}(r, r + dr) = K \cdot \hat{g}_{\bar{u}}(r, r + dr) - (K - 1) \cdot \hat{g}_{(j)}, \quad j = 1, \dots, K.$$

4. Leiame hinnangu suurusele  $g(r, r + dr)$ :

$$g^* = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K g_{*i}$$

ja dispersiooni hinnangu  $s_*^2 = \frac{s^2}{K}$ , kus

$$s^2 = \frac{1}{K - 1} \left[ \sum_{i=1}^K g_{*i}^2(r, r + dr) - \frac{1}{K} \left( \sum_{j=1}^K g_{*j}(r, r + dr) \right)^2 \right].$$

5. Kasutame  $g(r, r + dr)$  vahemikhinnangu saamiseks t-jaotust:

$$g_{alumine}(r, r + dr) = \hat{g}_{\bar{u}}(r, r + dr) - \bar{t}_{K-1, \frac{\alpha}{2}} \cdot s_*, \quad (2.6)$$

$$g_{\bar{u}lemine}(r, r + dr) = \hat{g}_{\bar{u}}(r, r + dr) + \bar{t}_{K-1, \frac{\alpha}{2}} \cdot s_*, \quad (2.7)$$

kus  $\bar{t}_{K-1, \frac{\alpha}{2}}$  on t-jaotuse  $\frac{\alpha}{2}$ - täiendkvantiil vabadusastmete arvu  $K - 1$  korral.

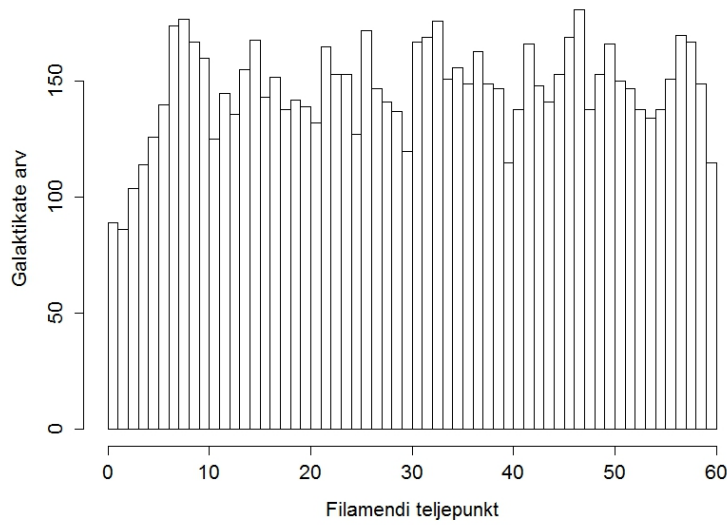
## 2.3 Tulemused

### Galaktikate paiknemine

Alapeatükis 2.1 kirjeldatud andmestiku abil näeme, kuidas asetsevad galaktikad filamendi telje  $0.5h^{-1}Mpc$  raadiusega ümbruses. Selleks, et kõikide vaadeldavate teljepunktide valitud ümbrused oleksid ühelaiused, on siin vaatluse all ka kuni  $0.25h^{-1}Mpc$  võrra üle otspunktide asuvad galaktikad. Vaadeldud on 330 filamenti, mis sisaldavad kokku 8781 galaktikat.

Jooniselt 2 on näha, et filamendi 47., 8., 33. ja 7. punkti ümber asub enim galaktikaid, vastavalt 181, 177, 176, 174. Esimese ja teise punkti lähistel paikneb kõigest 89 ja 86 galaktikat. See viitab, et filamendi alguspunkt ei ole ühtlaselt galaktikatega täidetud. See tähendab omakorda seda, et filamendi leidmise algoritm

tekitab teatud vea filamendi otspunkti ümbruses. Kuna filament on kokku pandud juppidest, siis otsmine jupp võibki olla nii-öelda õhus. Seal ei eksisteeri enam reaalne filament, vaid meetodist tingitud viga.



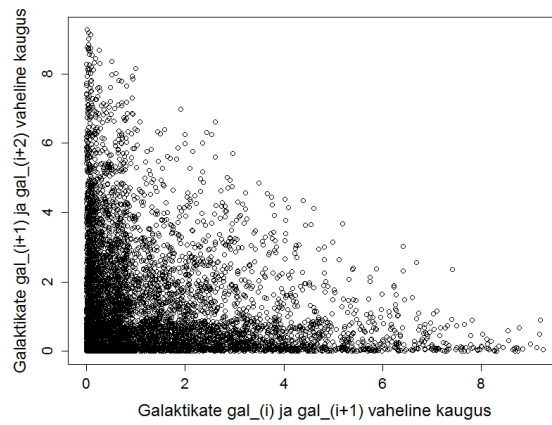
Joonis 2. Filamendi teljest  $0.5h^{-1}Mpc$  kaugusel asetsevate galaktikate paiknemine piki telge.

### **Vaadeldava galaktika naabergalaktikate kaugused**

Edasises analüüsis huvitavad ainult need galaktikad, mis asuvad filamendi telje ümbruses, üle otspunkti asuvad viskame välja. Selliseid galaktikaid on 8727.

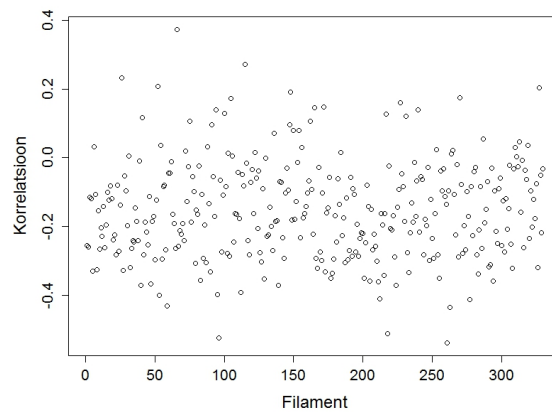
Joonisel 3 on toodud igal filamendil iga vaadeldava galaktika  $gal_{i+1}$  korral tema kaugus parempoolsest ( $gal_{i+2}$ ) ja vasakpoolsest ( $gal_i$ ) galaktikast. Uurimise all on ainult need galaktikad, mis omavad nii parempoolset kui vasakpoolset naabrit. Selliseid objekte on 8065. Juhul kui kaugus  $gal_{i+1}$  ja  $gal_i$  vahel on alla  $2h^{-1}Mpc$  võiks oodata samuti väiksemat kaugust  $gal_{i+1}$  ja  $gal_{i+2}$  vahel, kuid kaugema vasakpoolse galaktika ( $gal_i$ ) puhul ootame lähemat parempoolset galaktikat ( $gal_{i+2}$ ).

Sarnaselt omades kauget parempoolset galaktikat ( $gal_{i+2}$ ) ootame lähemal asuvat vasakpoolset naabrit ( $gal_i$ ).



Joonis 3. Filamendi teljele projekteeritud galaktikate  $gal_{i+1}$  kaugused naabergalaktikatest ( $h^{-1}Mpc$ ).

Selle järgi on ootuspärane pigem negatiivne korrelatsioon vaadeldava galaktika naabergalaktikate kauguste vahel.



Joonis 4. Filamendi teljele projekteeritud galaktikate naabergalaktikate kauguste vaheline Pearsoni korrelatsioon.

Selle täpsemaks teada saamiseks leitakse igal filamendil naabergalaktikate kauguste vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad. Jooniselt 4 on näha, et korrelatsioonid jäävad  $-0.538$  ja  $0.4$  vahele, millest suurem osa on negatiivsed. Keskmine Pearsoni korrelatsioonikordaja väärtus on  $-0.1522$ . Võiks öelda, et pigem on nõrk kalduvus galaktikal omada ühte lähedal ja teist kaugel asuvat naabergalaktikat.

Korrelatsioonid on ikkagi üpriski kesised. Märgime, et taolised korrelatsioonid galaktikate ühtlase jaotuse korral filamendi teljel puuduvad. Sel juhul kaugused on sõltumatud. Seega räägib antud analüüs galaktikate ühtlase jaotuse vastu.

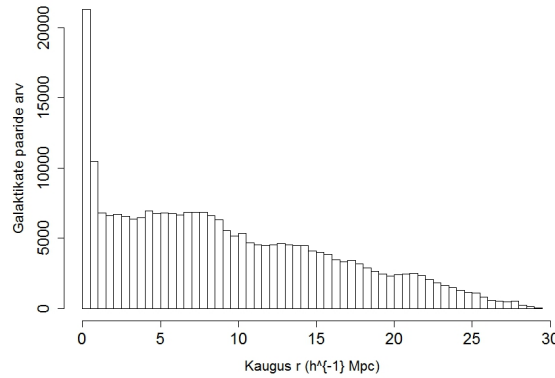
### Filamendi kõikide galaktikate vahelised kaugused

Järgnevalt uuritakse igal filamendil kõikide galaktikate vahelisi kauguseid, st kui filamendil  $i$  leidub  $N_i$  galaktikat, siis vaadeldakse  $N_i \cdot (N_i - 1)$  kaugust, kus  $i \in \{1, 330\}$ . Huvi pakub, kas galaktikate vahel on mingi eelistatud kaugus või asetsevad nad telje ümber juhuslikult. Selle teada saamiseks kasutatakse alapeatükis 2.2 konstrueeritud seost (2.5), mille abil saadakse paaris-korrelatsioonifunktsioon  $g(r)$ . Eelnev suurus hindab proportsiooni fikseeritud kauguse vahemikus  $(r, r + dr]$  leiduvate juhuslike punktipaaride ja vaadeldava andmestiku punktipaaride vahel. Kui galaktika väärtused on suuremad kui 1, esineb galaktikate seas vahekaugus  $r$  enam kui oleks ühtlase jaotuse korral.

Kauguse  $r$  jaoks määratakse akna laiuks  $dr = 0.5h^{-1}Mpc$ . Suuruse  $DD$  konstrueerimiseks loetakse akna  $(r, r+0.5]$  tarvis üle kõik need galaktikate paarid, mis asuvad teineteisest kaugusel  $rh^{-1}Mpc$  kuni  $(r + 0.5)h^{-1}Mpc$ . Loodud andmestikus on maksimaalseks filamendi pikkuseks 60 punkti, st ligikaudu  $30h^{-1}Mpc$ . Seega on võimalikud vahemikud  $(0, 0.5], \dots, (29.5, 30]$ .

Joonisel 5 on näha galaktikate vaheliste kauguste jaotus. Galaktikapaaride hulk, mille omavaheline kaugus on  $0h^{-1}Mpc$  kuni  $0.5h^{-1}Mpc$  on andmestikus suurim,

sellele järgneb  $0.5h^{-1}Mpc$  kuni  $1h^{-1}Mpc$  vahekaugusega galaktikate hulk. See efekt tuleneb sellest, et konsrueeritud andmestiku puhul on vaatluse all ka parvedes asuvad galaktikad (tunnus *nrich*). Selline struktuur nagu galaktikaparv moodustub üksteisele lähedal asuvatest galaktikatest. Jooniselt 5 on näha, et alates va-



Joonis 5. Galaktikate kaugused teineteisest 330 filamendi pealt.

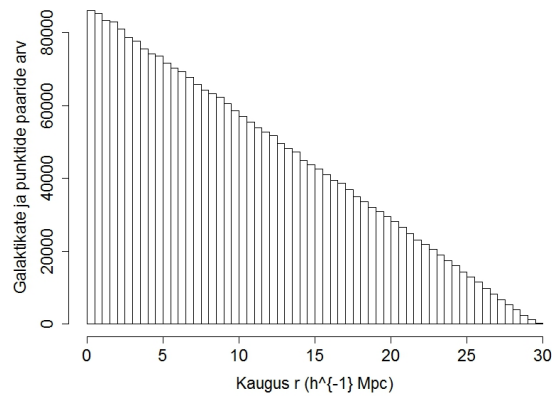
hekaugusest  $1h^{-1}Mpc$  väheneb tasapisi vaadeldavate paaride hulk andmestikus. Alates vahekaugusest  $4h^{-1}Mpc$  algab aga pisikene tõus, mis taspisi kõikudes jätkub kauguseni  $8.5h^{-1}Mpc$ . Edasi toimub sarnane kõikumine, kuid üldjoontes on galaktikapaaride hulk järk-järgult kahanev. See on tingitud ka lõplikust filamendi pikkusest.

Tunnuse  $\hat{\xi}_{DP}$  (vt. valem (2.5)) loomiseks on tarvis genereerida iga filamendi jaoks ühtlasest jaotusest juhuslikke suurusi aknas  $W = [0, 30]$ . Seega luuakse 330 akent  $W$ , kuhu visatakse ühtlase jaotusega juhuslikke suurusi. Iga galaktikate punktihulga (filamendi) jaoks on loodud üks juhuslik punktihulk teljel  $[0, 30]$ , mis sisaldab 10 korda rohkem punkte kui temale vastav filament.

Suuruse  $DR$  loomiseks leitakse iga filamendi siseselt iga galaktika kaugus sellele vastavatest ühtlase jaotusega juhuslikest punktidest. Juhul kui filament sisaldab  $N$  galaktikat, siis ühtlase jaotusega aknas  $[0, 30]$  on  $N \cdot 10$  punkti ning

nendevahelisi kauguseid on  $N \cdot (N \cdot 10)$ . Vaadeldavad vahemikud on samuti  $(0, 0.5], \dots, (29.5, 30]$ .

Jooniselt 6 on näha, et vastava kaugusvahemikuga galaktika ja ühtlase jaotusega punkti paaride hulk on kaugusevahemiku  $(r, r + dr]$  kasvades lineaarselt kahanev.



Joonis 6. Galaktikate kaugused ühtlase jaotusega paiknevatest punktidest 330 filamendi pealt.

David ja Peebles korrelatsioonifunktsiooni (vt. valem (2.5)) loomisel leitakse iga filamendi jaoks nad eraldi

$$\hat{\xi}(r, r + dr)_{DP_i}, \text{ kus } i \in \{0, 330\} \text{ ning } (r, r + dr] \in \{(0, 0.5], \dots, (29.5, 30]\}.$$

Seejärel leitakse iga selle vahemiku tarvis keskmine korrelatsioonifunktsiooni väärtus üle kõikide filamentide

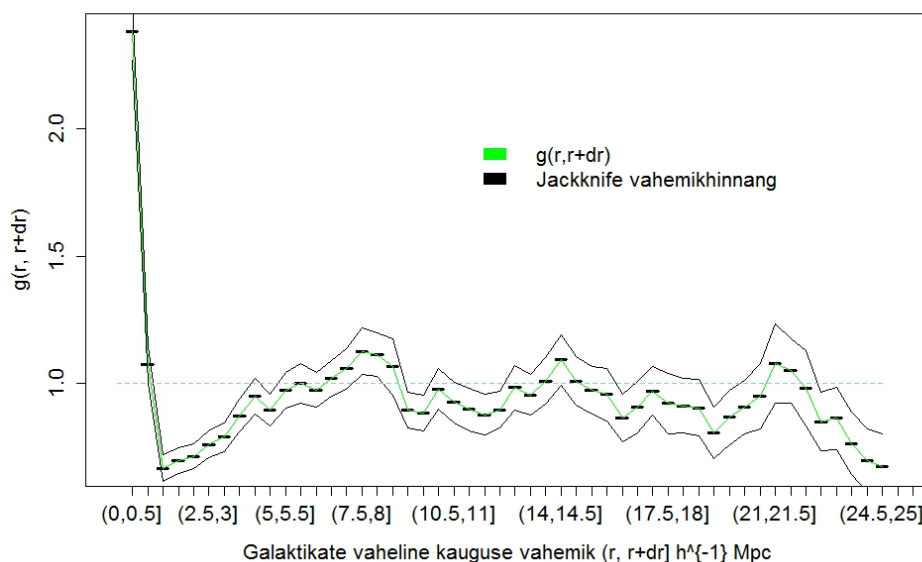
$$\overline{\hat{\xi}(r, r + dr)_{DP}} = \frac{\sum_{i=1}^{330} \hat{\xi}(r, r + dr)_{DP_i}}{330}. \quad (2.8)$$

Nendest moodustatakse paaris-korrelatsioonifunktsioon

$$g(r, r + dr) = \overline{\hat{\xi}(r, r + dr)_{DP}} + 1, \text{ kus } [r, r + dr] \in \{(0, 0.5], \dots, (29.5, 30]\}.$$

Jackknife meetodil leitakse uuritavale paaris-korrelatsioonifunktsioonile  $g(r, r + dr)$  vahemikhinnang. Vastavalt alapeatükis 2.2 kirjeldatud eeskirjale saadakse usalduspiirid  $g_{\text{ülemine}}(r, r + dr)$  ja  $g_{\text{alumine}}(r, r + dr)$  (vt.valemeid (2.6) ja (2.7)).

Jooniselt 7 on näha, et galaktikate vahelist kaugust  $0h^{-1}Mpc$  kuni  $0.5h^{-1}Mpc$  leidub filamend  $0.5h^{-1}Mpc$  raadiusega ümbrusest teljele projekteeritud galaktikate seas kordades rohkem olukorrast, kus galaktikad oleksid jaotunud ümber telje ühtlaselt. See tuleneb galaktikaparvede efektist. Väikseim väärtus on kohal  $g(1, 1.5)$ , mis on ligikaudu 0.67.



Joonis 7. Galaktikate vaheliste kauguste paaris-korrelatsioonifunktsioon.

See tähendab, et galaktikate vahelist kaugust  $(1, 1.5]$  megaparsekit leidub andmestikus vähem kui vaadeldava juhusliku jaotusega punktide korral. See viitab sellele, et kaks galaktikaparve ei asu teineteisele väga lähedal. Kahe parve vahel on nii-öelda tühi ruum, kus teisi galaktikaid ja parvi leidub vähem. See on ka oodatav tulemus, kuna parved on endasse kokku korjanud lähiümbruses asuvad



galaktikad.

Huvi pakuvad juhud, mil paaris-korrelatsioonifunktsioon ületab ühte, need on:

$$g(r, r + dr) > 1, \text{ kui} \\ (r, r + dr] \in \{(6.5, 7], \dots, (8.5, 9], (14, 14.5], (21, 21.5], (21.5, 22]\}.$$

Suurim väärtus nende hulgast on kohal  $g(7.5, 8) = 1.127$ . Saab öelda, et galaktikad ei ole jaotunud ümber filamendi telje ühtlase jaotusega. Kõige enam eelistavad nad omada vahekaugust  $(7.5, 8] h^{-1} Mpc$ , millele järgneb vahekaugus  $(8, 8.5] h^{-1} Mpc$  ning  $(14, 14.5] h^{-1} Mpc$ . Vahemike  $(5.5, 6]$ ,  $(13.5, 14]$ ,  $(14.5, 15]$  korral on  $g(r, r + 0.5)$  ligilähedane ühele. See näitab, et vaadeldava vahekauguse raames esineb galaktikate hulgas seda sama tihti kui ühtlase jaotusega punktide korral. Konstrueeritud Jackknife vahemikhinnang näitab vahemikku, millesse tõenäosusega 0.95 filamendile projekteeritud galaktikate vaheliste kauguste paaris-korrelatsioonifunktsioon satub. Vahemik järgib hästi hinnatud  $g(r, r + dr)$  kuju ning kinnitab ta õigsust.

Paaris-korrelatsioonifunktsiooni konstrueerimismeetodi tõttu on igal eraldi-seisval katsel tulemused natukene erinevad. Erinevatel katsetel luuakse uued ühtlase jaotusega juhuslikud suurused. Seetõttu annavad teistel kordadel eelnevalt mainitud vahemikud funktsioonile natukene teistsugused väärtused. Kõige enam eelistatud vahekaugused jäävad siiski paika. Erinevusi eraldiseisvate katsete vahel saab vähendada, kui suurendada juhuslike punktide arvu  $N_{rd}$ . See omakorda suurendab ka arvutusaega.

### 3 Galaktikaparvede paiknemine piki filamendi telge

Antud peatükis selgitame välja filamendi teljest  $0.5h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvate galaktikaparvede paiknemise piki filamendi telge. Seejärel on fookuse all võimalik statistiline seos kahe naaberkauguse vahel, mis on võetud galaktikaparvest tema vasakpoolse ja parempoolse naaberparveni. Lõpuks vaadeldakse kõikide galaktikaparvede vahelisi kaugusi piki filamendi telge ja võrreldakse seda ühtlase jaotuse korral esinevate kaugustega.

#### 3.1 Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine

Andmestiku  $A3$  tunnuste  $nrich$  ja  $rank$  abil valitakse galaktikaparvede peagalaktikad ( $nrich > 1, rank = 1$ ). Vastavalt eelnevas peatükis 2.1 toodud meetodile lõigatakse uuesti esialgne andmestik  $A3$  väiksemaks, kuid seekord on vaatluse all parvede peagalaktikad. Ühest alguspunktist loetud  $30h^{-1}Mpc$  pikkused filamendid sisaldavad 969 parve ning teisest otsast loetud 970 parve.

Kasutades eelnevas peatükis loodud mõttekäiku (vt. 2.1) leiame igal filamendil galaktikaparvede vahelised kaugused. Esmalt leitakse parve peagalaktika ja lähima filamendi teljepunkti vaheline kaugus  $dist(parv_i, lähimpunkt_k)$  (vt. valem (2.1)). Eelneva tunnuse ning tunnuse ( $fil\_dist$ ) abil leitakse parve kaugus lähimast filamendi teljepunktist piki telge ( $parvtelg$ ). Seejärel tehakse kindlaks kummale poole punkti see parv jääb:

$$kood = \begin{cases} -1, & \text{kui parv on eelnevale filamendi punktile lähemal,} \\ +1, & \text{kui parv on järgnevale filamendi punktile lähemal.} \end{cases}$$

Järgmisena leitakse galaktikaparve kaugus otspunktist, selleks luuakse valem

$$parvkaugused = (lähimpunkt - 1) \cdot 0.5 + kood \cdot parvtelg. \quad (3.1)$$

Kasutades saadud tunnust *parvkaugused* leitakse iga parve kaugus kõikidest teis-test parvedest (*suurvektor\_p*) ning naaberparvedest (*parvparvkaug*) sellel fila-mendil.

## 3.2 Meetodid

### Korrelatsioonifunktsiooni hindamine

Galaktikate vaheliste kauguste uurimiseks luuakse paaris-korrelatsioonifunktsioon, mis leitakse seosest  $g(r, r + dr) = \xi(r) + 1$ . Korrelatsioonifunktsiooni hinnang  $\hat{\xi}(r)$  saadakse kasutades *Peebles ja Hauser hinnangut*.

**Definitsioon 3.1.** *Peebles ja Hauser hinnang korrelatsioonifunktsioonile  $\xi(r)$  on antud võrdusega*

$$\hat{\xi}(r)_{PH} = \frac{DD(r)}{RR(r)} \cdot \left( \frac{N_{rd}}{N} \right)^2 - 1, \quad (3.2)$$

*kus suurus  $DD(r)$  on defineeritud Definitsioonis 2.1. Suurus  $RR(r)$  on aknas  $W$  ühtlasest jaotusest genereeritud punktide seas selliste paaride arv, mis asuvad teineteisest kaugusel  $[r, r + dr]$ .*

### Jackknife meetod

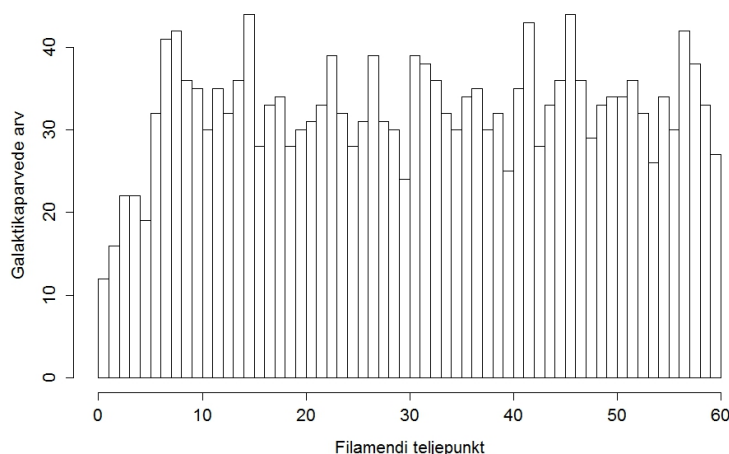
Jackknife meetodi abil konstrueerime ligikaudse usaldusvahemiku  $g(r, r + dr)$  jaoks. Üldideed selle tulemuse saamiseks on kirjeldatud alapeatükis 2.2.

## 3.3 Tulemused

### Parvede paiknemine

Alapeatükis (vt.3.1) kirjeldatud andmestiku abil näeme, kuidas asetsevad parved filamendi telje  $0.5h^{-1}Mpc$  raadiusega ümbruses. Vaatluse all on 330 filamenti, mis sisaldavad kokku 1939 galaktikaparve.

Joonisel 8 on näha, et filamendi 46., 15., 42., 57. ja 8. punkti ümber asub enim galaktikaparvi, vastavalt 44, 44, 43, 42, 42. Esimese ja teise punkti lähistel paikneb kõigest 12 ja 16 galaktikaparve. Vähene parvede paiknemine filamendi alguspunktis kinnitab jällegi filamentide loomise meetodis tekkivat viga.



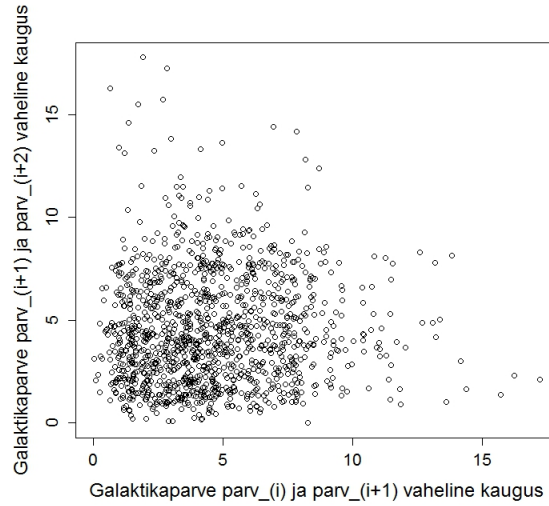
Joonis 8. Filamendi teljest  $0.5h^{-1}Mpc$  kaugusel asetsevate galaktikaparvede paiknemine piki telge.

### Vaadeldava parve naaberparvede kaugused

Edasises analüüsis huvitavad ainult need parved, mis asuvad filamendi telje ümbuses, üle otspunkti asuvad viskame välja. Selliseid galaktikaparvi on 1931.

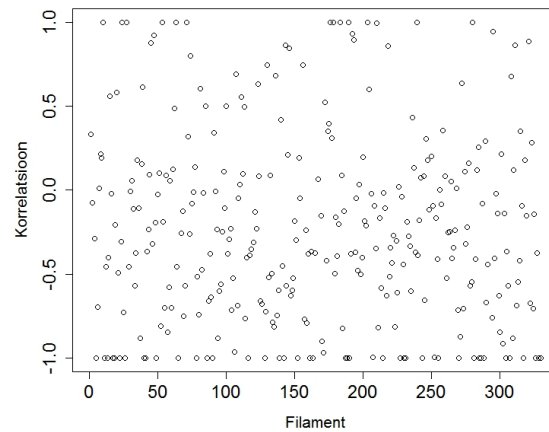
Joonisel 9 on toodud igal filamendil iga vaadeldava galaktikaparve  $parv_{i+1}$  korral tema kaugus parempoolsest ( $parv_{i+2}$ ) ja vasakpoolsest ( $parv_i$ ) parvest. Uurimise all on ainult need galaktikaparved filamendil, mis omavad nii parempoolset kui vasempoolset naabrit. Selliseid objekte on 1269. Parempoolse ja vasakpoolse naaberparve kaugus vaadeldavast parvest jääb enamasti alla  $10h^{-1}Mpc$ . Kaugemaid naabreid omab kõigest 42 galaktikaparve. Kaugusel  $(4, 5] h^{-1}Mpc$  asuvaid naabreid omab kõige rohkem parvi, tervelt 195 parve. Joonise 9 põhjal tundub, et

naabergalaktikate kauguste vahel ei tohiks korrelatsiooni olla.



Joonis 9. Filamendi teljele projekteeritud galaktikaparve  $parv_{i+1}$  kaugus naaberparvedest ( $h^{-1}Mpc$ ).

Jooniselt 10 on näha, et Pearsoni korrelatsiooni väärtused omavad isegi väärtuseid  $-1$  ja  $+1$ , mis näitavad vastavalt väga tugevat vastassuunalist ja



Joonis 10. Filamendile projekteeritud naabergalaktikaparvede kauguste vaheline Pearsoni korrelatsioon.

samasuunalist lineaarset seost. Silmas tuleb aga pidada siinkohal seda, et vaadeldud 330 filamendi ümber paikneb 1269 galaktikaparve, mis teeb keskmiselt 3.8 parve filamendi kohta. Seega võib kergelt esineda filament, kus on ainult 2 sobivat parve, mis puhul Pearsoni korrelatsioonikordaja väärtus on kas  $+1$  või  $-1$ . Tervelt 17 filamendi korral Pearsoni korrelatsioonikordajat ei arvutata, sest nad sisaldava kõigest ühte parve, mis omab mõlemat naabrit. Kõige rohkem, tervelt 11 vaadeldavat parve, sisaldab üks filament. Vaadeldud 330'1 filamendil on enam negatiivseid korrelatsiooni väärtuseid. Keskmise Pearsoni korrelatsioonikordaja väärtus on  $-0.23134$ . Taolised korrelatsioonid galaktikaparvede ühtlase jaotuse korral filamendi teljel puuduvad. Seega saame öelda, et antud analüüs räägib galaktikaparvede ühtlase jaotuse vastu.

### **Filamendi kõikide galaktikaparvede vahelised kaugused**

Järgnevalt uuritakse igal filamendil kõikide parvede vahelisi kauguseid, st kui filamendil  $i$  leidub  $P_i$  parve, siis vaadeldakse  $P_i \cdot (P_i - 1)$  kaugust, kus  $i \in \{1, 330\}$ . Huvi pakub, kas parvede vahel on mingi eelistatud kaugus või asetsevad nad telje ümber juhuslikult. Selle teada saamiseks kasutatakse alapeatükis 3.2 konstrueeritud seost  $\hat{\xi}_{PH}$  (vt. valem (3.2)), mille abil saadakse paaris-korrelatsioonifunktsioon  $g(r)$ .

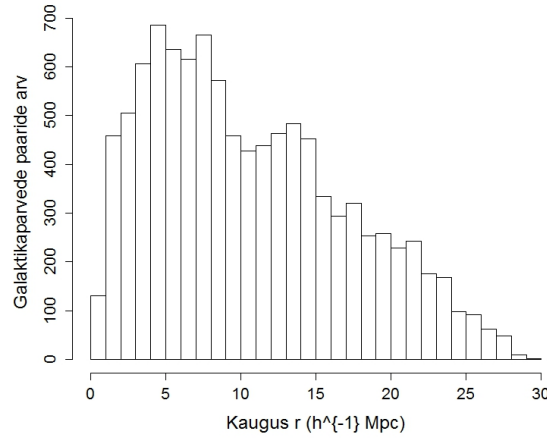
Kauguse  $r$  tarvis valitakse akna laiuks  $1h^{-1}Mpc$ , sest parvesid on filamentide telgedel oluliselt vähem kui galaktikaid ning nende vahelised kaugused on enamjaolt suuremad. Korrelatsioonifunktsiooni loomisel on vajalik, et vaatluse all olevasse aknasse paare satuks. Vastasel juhul tekivad null-hulgalised vahemikud, mis raskendavad  $\hat{\xi}_{PH}$  leidmist. Seega on võimalik uurimise all olev vahemike hulk järgnev:

$$(r, r + dr] \in \{(0, 1], (1, 2], \dots, (28, 29], (29, 30]\}. \quad (3.3)$$

Suuruse  $DD$  tarvis loetakse iga vahemiku tarvis parvede paarid, mis asetsevad

teineteisest vaadeldaval kaugusel.

Joonisel 11 on näha vaadeldavate galaktikaparvede vaheliste kauguste jaotus. Võrreldes Joonist 11 Joonisega 5 on näha suurt erinevust just  $(0, 1]h^{-1}Mpc$  suuruse kaugusega objektide hulgas. Galaktikate vaheliste kauguste vaatlemisel oli sellel juhul tegemist parvede efektiga, antud juhul on aga need lähedal asuvad objektid võetud kokku üheks kogumiks (parv).



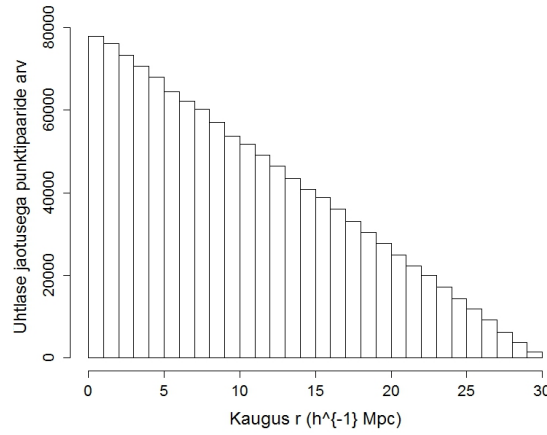
Joonis 11. Galaktikaparvede kaugused teistest samal filamendil asuvatest parvedest.

Vahemikus  $(1, 5]h^{-1}Mpc$  tõuseb vaadeldavate paaride arv, saavutades vahemikus  $(4, 5]$  maksimumi, tervelt 686 galaktikaparve paariga. Üldjoontes toimub alates  $8h^{-1}Mpc$  galaktikaparvede paaride vähenemine vaadeldavates vahemikes. Kahanemine on jällegi kõikuv, kerkides natukene vahemikes  $(13, 14]$  ja  $(17, 18]$ .

Korrelatsioonifunktsiooni  $\hat{\xi}_{PH}$  loomiseks on tarvis genereerida iga vaadeldava filamendi jaoks ühtlase jaotusega juhuslikke suurusi aknas  $W = (0, 30]$ . Sarnaselt alapeatükile 2.3 luuakse 330 akent  $W$ , kuhu genereeritakse 10 korda rohkem ühtlase jaotusega juhuslikke suurusi kui vastavas filamendis  $i$  on galaktikaparvi. Suuruse  $RR$  loomiseks leitakse iga selle juhusliku punktikogumi korral kõikide

juhuslike punktide kaugused teineteisest vaadeldavas aknas  $W_i$ , kus  $i \in \{1, 330\}$ . Juhul kui filament  $i$  sisaldab  $P_i$  parve, siis vaadeldavaid juhuslikke punkte aknas  $W_i$  on  $P_i \cdot 10$  ning nendevahelisi kauguseid on  $(P_i \cdot 10) \cdot (P_i \cdot 10 - 1)$ . Vaadeldavad punktide vaheliste kauguste vahemikud on kirjeldatud ülal (vt.3.3).

Jooniselt 12 on näha, et vastava kaugusvahemikuga ühtlase jaotusega punktipaaride hulk on lineaarselt kahanev. Joonisel 11 kujutatud parvede vaheliste kauguste jaotus on sellest pildist vägagi erinev.



Joonis 12. Ühtlase jaotusega juhuslike punktide vahelised kaugused 330-l lõigul.

Peebles ja Hauser korrelatsioonifunktsiooni (vt.valem (3.2)) loomisel leitakse iga filamendi jaoks nad eraldi

$$\hat{\xi}(r, r + dr)_{PH_i}, \text{ kus } i \in \{0, 330\} \text{ ning } (r, r + dr] \in \{(0, 1], \dots, (29, 30]\}.$$

Seejärel leitakse iga selle vahemiku tarvis keskmine korrelatsioonifunktsiooni väärtus üle kõikide filamentide

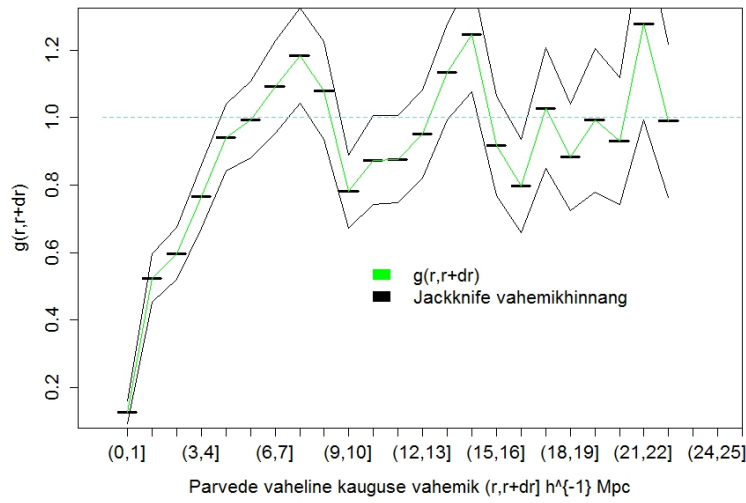
$$\overline{\hat{\xi}(r, r + dr)_{PH}} = \frac{\sum_{i=1}^{330} \hat{\xi}(r, r + dr)_{PH_i}}{330}. \quad (3.4)$$

Nendest moodustatakse paaris-korrelatsioonifunktsioon



$$g(r, r + dr) = \overline{\hat{\xi}(r, r + dr)_{PH}} + 1, \text{ kus } [r, r + dr] \in \{(0, 1], \dots, (29, 30]\}.$$

Jooniselt 13 on näha, et galaktikaparvede vahelisi kaugusvahemikke  $(0, 1]$ ,  $(1, 2]$ ,  $(2, 3]$  esineb filamentidel tunduvalt harvemini kui ühtlase jaotusega punktide korral. Puuduvad lähestikku asuvad parved, sest kaks parve ei saa füüsikalistel kaalutlustel teineteisele väga lähedal olla.



Joonis 13. Galaktikaparvede vaheliste kauguste paaris-korrelatsioonifunktsioon.

Huvi pakuvad juhud, mil paaris-korrelatsioonifunktsioon ületab ühte, need on:

$$g(r, r + dr) > 1, \text{ kui}$$

$$(r, r + dr] \in \{(6, 7], (7, 8], (8, 9], (13, 14], (14, 15], (17, 18], (21, 22]\}.$$

Suurimad väärtused paaris-korrelatsioonifunktsioonil nende hulgas on kohtadel  $g(21, 22) = 1.278$ ,  $g(14, 15) = 1.247$  ning  $g(7, 8) = 1.183$ . Saab öelda, et galaktikaparved ei ole jaotunud ümber filamenti telje ühtlase jaotusega. Kõige enam eelistavad nad omada vahekaugust  $(21, 22] h^{-1} \text{ Mpc}$ , millele järgneb vahekaugus  $(14, 15] h^{-1} \text{ Mpc}$  ning  $(7, 8] h^{-1} \text{ Mpc}$ . Kolme enim eelistatud vahekauguse

järjestus võib muutuda, kui genereerime jälle uued ühtlasest jaotusest juhuslikud suurused. Funktsiooni  $g(r, r + 1)$  väärtused on ligilähedased ühele vahemikes  $(5, 6]$ ,  $(12, 13]$ ,  $(17, 18]$ ,  $(19, 20]$ ,  $(22, 23]$ . Teistel katsetel võivad anda eelnevalt mainitud vahemikud tulemuseks ühest suurema paaris-korrelatsioonifunktsiooni väärtuse. Siiski on need suurused  $1'\text{le}$  lähedased. See näitab, et vaadeldava vahekauguse raames esineb galaktikaparvede hulgas seda sama tihti kui ühtlase jaotusega punktide korral. Konstrueeritud Jackknife vahemikhinnang näitab vahemikku, millesse tõenäosusega 0.95 filamendile projekteeritud galaktikaparvede vaheliste kauguste  $g(r, r + 1)$  satub. Vahemik järgib hästi hinnatud  $g(r, r + 1)$  kuju ning kinnitab ta õigsust.

Korrelatsioonifunktsiooni analüüsist saab kokku võtta, et eelistatud vahekaugus kahe parve vahel on  $7h^{-1}Mpc$ . Kui see on perioodiline, tekivad maksimumid ka  $15h^{-1}Mpc$  ja  $21h^{-1}Mpc$  kandis, mis on paaris-korrelatsioonifunktsioonis ka märgata (vt. Joonist 13). See on selline regulaarsus, mida varasemates analüüsides ei ole täheldatud. Suure tõenäosusega on see seotud galaktikate filamentide tekkega. Selle täpsemat füüsikalist mõju tuleb alles uurida.

## 4 Filamentide otsatüüpide uurimine

Tähelepanu all on vaatlajast (meist)  $100h^{-1}Mpc$  kuni  $250h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvad filamentid, mille mõlemad otspunktid jäävad sellesse vahemikku. Selliseid filamente on 8144, otspunkte on seega kokku 16288.

Käesolev peatükk võtab vaatluse alla filamentide otspunktide ümber loodud  $2h^{-1}Mpc$  ja  $1h^{-1}Mpc$  raadiusega kera sisse sattuvad struktuurid. Esiteks uuritakse filamentide otspunktide juures paiknevaid galaktikaparvi. Teiseks vaadeldakse mitu otspunkti asub vaadeldava filamenti otspunkti ümber konstrueeritud kera. Kolmandana pakub huvi see, mitu filamenti läbib seda kera. Viimasena vaadeldakse otspunktide ümber loodud kerade jaotust nende sisse sattuvate filamentide otspunktide arvu ja telgede arvu järgi.

### 4.1 Filamenti otspunkti ümber paiknevad galaktikaparved

Huvi pakub filamentide otspunktide ümber konstrueeritud  $2h^{-1}Mpc$  ja  $1h^{-1}Mpc$  raadiusega kerade sisse sattuvate galaktikaparvede rikkused.

#### Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine

Valituks jäävad vaatlajast  $98h^{-1}Mpc$  kuni  $252h^{-1}Mpc$  kaugusel olevad galaktikaparved, nendest 109729 paikneb filamentide ümber ning 4457 ei kuulu ühegi ümbrusesse. Galaktikaparved, mis ei kuulu telgede ümbrusesse, ei asu ühegi vaatluse all oleva otspunkti  $2h^{-1}Mpc$  ega  $1h^{-1}Mpc$  raadiusega kera sisemuses. Seega need parved jäetakse edasises analüüsis välja.

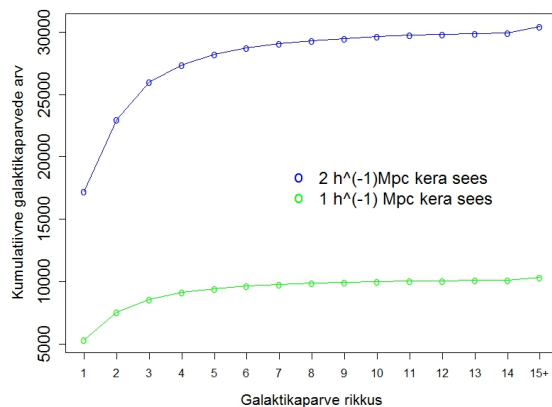
Järgnevalt jäetakse valikusse filamenti teljest maksimaalselt  $2h^{-1}Mpc$  või  $1h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvad galaktikaparved. Neid tingimusi täidavad vastavalt 56880 ja 36298 galaktikaparve. Sel viisil loodud galaktikaparvede andmestikke vaadeldakse eraldi.

Esimest tingimust täitvate parvede korral leitakse kõikide sobivate filamentide otspunktide  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega kera sees leiduvad. Selleks kontrollitakse iga otspunkti kaugust vaadeldavast galaktikaparvest (koordinaatide  $x, y, z$  abil). Samuti leitakse teist tingimust täitvate galaktikaparvede korral  $1h^{-1}Mpc$  kera sees leiduvad. Kõikide sobivate galaktikaparvede summa on vastavalt 30470 ja 10335.

## Tulemused

Galaktikaparved on vaatluse all peagalaktikate abil, igale neist on määratud tunnuse *nrich* abil parve rikkus. Huvi pakub kahe erineva raadiusega kera sees asuvate galaktikaparvede rikkused.

Joonisel 14 on nende galaktikate parvede arvu kumulatiivne jaotus, mis on otspunkti vastavas läheduses rikkusega ( $1, \dots, 15+$ ). Galaktikaparved rikkusega 15 või enam on võetud kokku. Vaadeldes otspunktide ümber kera raadiusega  $1h^{-1}Mpc$ , oli suurim galaktikaparve rikkus 169, kera raadiusega  $2h^{-1}Mpc$  oli see 256.



Joonis 14. 8144 filamentide kahe otspunkti ümber loodud kera sisse jäävate galaktikaparvede kumulatiivne arv nende rikkuse järgi.

Vaadeldud 8144 $'st$  filamendist ei oma  $2h^{-1}Mpc$  või  $1h^{-1}Mpc$  raadiusega ke-  
ras galaktikaparvi vastavalt 31 ja 1705 filamenti. See tulemus viitab sellele, et  
filamentide kokku panemise algoritm vajab täiendamist. Filamendi otsmine jupp  
ripub nii-öelda õhus, seal ei ole enam tegelik filament. Seal eksisteerib antud ju-  
hul meetodist tingitud viga. Jooniselt 14 on näha, et filamendi otpunkti ümber  
konstrueeritud  $2h^{-1}Mpc$  kera sees on 17248 ning 5765 galaktikaparve vastavalt  
rikkusega 1 ja 2. Nendele järgnevad parved rikkusega 3 ja 4, mida leidub kokku  
vastavalt 2984 ja 1414. Väiksema kera sisse satub juba palju vähem galaktikapar-  
vesid. Kõige enam on seal parvesid rikkusega 1, 2 ja 3, vastavalt leidub neid 5322,  
2216 ja 1049.

## 4.2 Filamendi otpunkti ümber paiknevad teiste filamentide otspunktid

Huvi pakub filamentide hulk, mille otpunkti läheduses maksimaalselt  $2h^{-1}Mpc$   
kaugusel on teise filamendi otpunkt, ning kui mitu sellist otpunkti ühel filamen-  
dil leidub.

### Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine

Sel korral on tähelepanu all valitud 8144 filamendi mõlema otpunkti ümber loo-  
dud  $2h^{-1}Mpc$  kera sisse sattuvad filamentide otpunktid. Kõikidest andmestikus  
 $A2$  sisalduvatest filamentide otpunktidest jääb 17141 vaatlejast sobivasse kau-  
gusvahemikku  $[98, 252]h^{-1}Mpc$ . Kasutades andmestikus  $A2$  leiduvaid koordinaa-  
te  $(x, y, z)$  ja tema kaugust vaatlejast ( $dist$ ) leitakse sobivate punktide kaugused  
vaadeldavast filamendi otpunktist.

## Tulemused

Joonisel 15 on näha, kui mitmes filamendile konstrueeritud keraskasub mõne teise filamendi otspunkt.

		Filamendi teine otspunkt						
		0	1	2	3	4	5	Summa
Filamendi esimene otspunkt	0	2772	1343	491	111	7	2	4726
	1	1235	637	284	68	3	0	2227
	2	522	271	123	45	4	1	967
	3	104	58	28	1	1	0	192
	4	14	9	5	2	0	0	30
	5	1	1	0	0	0	0	2
Summa		4648	2319	931	227	16	3	8144

Joonis 15. Filamentide jaotus kahe otspunkti ümber loodud  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega keraskas leiduvate teiste filamentide otspunktide arvu järgi.

Vaadeldud otspunktide seast sattus 9808 otspunkti loodud ruumi-keradesse. Joonis 15 näitab infot 8144 filamendi kohta. Kõige enam (2772) on neid filamente, mille mõlema otspunkti ümber loodud kera sisse ei satu ühtegi teist otspunkti, neid on 34 protsenti kõigist juhtudest. Filamentide hulgad, mis omavad esimeseks või teiseks loetud otspunkti lähedal ühte otspunkti, on enam-vähem ühesuurused

(vastavalt 1235, 1343). Marginaalsummad kahe otpunkti raames erinevad teineteisest väga vähe. Filamente, mille mõlemas otpunktis olevas kera on 4 või 5 teist otpunkti, ei leidu. Juhul kui filamendi ühe kera sisse jääb 5 otpunkti, siis teise kera sisse ei satu rohkem kui 2 otpunkti. Filamentide arv, mille ühes otpunktis olevas kera asub teine otpunkt, on  $1343 + 1235 = 2578$ , vaadeldud filamentidest on see 31.7%. Filamentide arv, mille ühe otpunkti ümber asub kaks teist otpunkti, on  $522 + 491 = 1013$ , mis on 12.4% kõigist vaadeldutest.

See, kui filamendi otpunkti ümbruses ei leidu teisi otpunkte, ei tähenda veel, et otpunkt asuks tühjuses. On võimalus, et filamendi otpunkt asub teise filamendi küljes. See on see analüüs, mida uuritakse järgmistes peatükkides.

### 4.3 Filamentide otpunktidest mööduvad filamendid

Järgnevalt vaadeldaks 8144 filamendi otpunkti ümber loodud  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega kera läbivaid filamente. Läbivaks peetakse filamenti juhul, kui tema otpunktid kera sisse ei satu. Huvi pakub filamentide hulk, mille otpunktist möödub maksimaalselt  $2h^{-1}Mpc$  kauguselt teine filament ning kui mitu sellist mööduvat filamenti ühel filamendil leidub.

#### Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine

Andmestikust  $A2$  valime välja kõik need filamentide teljepunktid, mis asuvad vaatelejast kaugusvahemikus  $[98, 252]h^{-1}Mpc$ . Selliseid teljepunkte on 152235. Iga 8144 vaatluse all oleva filamendi korral leiame tema otpunktide kauguse sobivalt valitud filamentide punktidest. Kauguste leidmisel pakuvad fikseeritud otpunkti korral huvi ainult need teljepunktid, mis asuvad sellest otpunktist vaatelejale  $2h^{-1}Mpc$  võrra lähemal või kaugemal. Sobivaks valitakse kõik need teljepunktid, mille kaugus otpunktist on väiksem võrdne kui  $2h^{-1}Mpc$ . Kõikide otpunktide korral täidavad seda tingimust kokku 39393 punkti. Järgnevalt eemaldatakse

kõik sellise filamendi punktid, mille otpunkt sattus sellesse kerasse. Filtreerimise tulemusena jäi alles 16703 teljepunkti, mis asuvad 2657 filamendi otpunkti ümb-  
ruses. Need teljepunktid kuuluvad 2969'le erinevale filamendile.

## Tulemused

Joonis 16 näitab filamentide korral otpunktide ümber konstrueeritud  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega kera läbivate filamentide arvu. Kõikidest vaadeldud filamentidest ei läbinud teised filamendi kumbagi konstrueeritud kera 67.4'l protsendil juhtudest.

		Filamendi teine otpunkt			
		0	1	2	Summa
Filamendi esimene otpunkt	0	5487	1106	10	6603
	1	1246	265	4	1515
	2	23	3	0	26
Summa		6756	1374	14	8144

Joonis 16. Filamentide jaotus kahe otpunkti ümber loodud  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega kera läbivate filamentide arvu järgi.

Ühest otpunktist möödub teine filament 28.9'l protsendil, mõlemast otpunktist möödub filament 3.3'l protsendil. Seitsmel juhul möödub ühest otpunktist kaks ja teisest üks filament. Selliseid otpunktide paare ei leidunud, millede kera-



desse oleks sattunud kaks mööduvat filamenti. Kõikidest filamentidest 33'1 möödub ühest otspunktist kaks filamenti ning teisest null.

Võrreldes saadud tulemust alapeatüki 4.2 tulemusega, saab järeldada, et filamentid eelistavad otspunktide ümbruses omada pigem teiste filamentide otspunkte. See tähendab seda, et filamentid algavad eelistatult sealt, kus mõni teine filament lõpeb. Järgnevalt vaatleme, kuidas jaotub 16288 otspunkti nende kahe tunnuse raames.

#### **4.4 Filamendi otspunkti juures asuvad teised filamentid**

Käesolevas alapeatükis vaadeldakse kahe eelneva alapeatüki puhul leitud tunnuseid iga filamendi otspunkti korral. Vaatluse all on seekord filamentide otspunktid, st. objekte on 16288. Huvi pakub nende otspunktide jaotus, vastavalt seal leiduvate teiste otspunktide arvu ja läbivate filamentide arvu järgi.

##### **Andmete filtreerimine, sidumine ja loomine**

Kahes eelnevas alapeatükis leitud tunnused seotakse kokku. Luuakse uus andmeset, mis sisaldab iga otspunkti ümber loodud kera kohta seal asuvate filamentide otspunktide arvu ja seda läbivate filamentide arvu.

##### **Tulemused**

Jooniselt 17 on näha vaadeldud 16288'st otspunktist maksimaalselt  $2h^{-1}Mpc$  kaugusel asuvad teised filamentid. Vaatluse all on kaks kindlat viisi, kuidas see filament selles keras leiduda võib: seal asub tema otspunkt või tema telg (v.a. otspunkt). Kõikidest vaatluse all olevatest objektidest ( $\frac{6979}{16288} \cdot 100\%$ ) 42.9 protsenti ei oma ühtegi huvi pakkuvat filamendi elementi enda lähiümbruses. Joonise 17 põhjal saab leida järgnevaid tinglikke tõenäosuseid filamentide otspunktide kohta:

$$P(\text{läbivaid} \geq 1 \mid \text{otspunkte} = 0) = \frac{2359+36}{9374} = 0.2555,$$

$$P(\text{otspunkte} \geq 1 \mid \text{läbivaid} = 0) = \frac{4077+1841+412+45+5}{13359} = 0.4776,$$

$$P(\text{läbivaid} \geq 1 \mid \text{otspunkte} = 1) = \frac{465+4}{4546} = 0.1032,$$

$$P(\text{otspunkte} \geq 1 \mid \text{läbivaid} = 1) = \frac{465+57+7+1}{2889} = 0.1835.$$

Tuginedes eelnevalt leitud tõenäosustele saab teha järgnevaid järeldusi. Tõenäosus omada otspunkti ümber vähemalt ühte otspunkti ja mitte ühtegi telge on 0.4776. Peaaegu 2 korda on väiksem tõenäosus omada seal vähemalt ühte telge ja mitte ühtegi otspunkti. Juhul kui keras leidub üks teise filamentide otspunkt, on seal ka

		Otspunkti ümbrust läbivate filamentide arv				
		0	1	2	Summa	
Otspunkti ümber asuvate filamentide otspunktide arv	0	6979	2359	36	9374	
	1	4077	465	4	4546	
	2	1841	57	0	1898	
	3	412	7	0	419	
	4	45	1	0	46	
	5	5	0	0	5	
Summa		13359	2889	40	16288	

Joonis 17. Filamentide 16288 otspunkti ümber loodud  $2h^{-1}Mpc$  raadiusega kerade jaotus seal leiduvate otspunktide arvu ja telgede arvu järgi.

tõenäosusega 0.1032 vähemalt üks filamendi telg. Juhul kui keras leidub üks filamendi telg, leidub seal tõenäosusega 0.1835 vähemalt üks otspunkt. Kõigest 465 otspunkti ümber asub nii ühe filamendi telg kui ka teise filamendi otspunkt. Ühte telge ja kahte otspunkti omab maksimaalselt  $2h^{-1}Mpc$  kaugusel 57 otspunkti. Tõenäosusega 0 leidub vaadeldud kerades kaks telge ja kaks otspunkti. Viite ja nelja otspunkti omavad vastavalt 5 ja 45 sellist filamendi otspunkti, mille läheduses ei asu ühtegi telge. Ühel juhul asub otspunkti ümber loodud keras 1 läbiv filament ja 4 otspunkti.

Järelduseks saab öelda, et filamendid on väga keerulised süsteemid. Nad võivad olla omavahel ühendatud väga erinevatel viisidel.

## 5 Kokkuvõte

Antud töö eesmärgiks oli leida seaduspärasusi filamente moodustavate galaktikate ja galaktikaparvede paiknemises piki filamendi telge. Samuti oli eesmärgiks leida filamentide otsatüüpide esinemissagedused vaadeldavas universumis.

Esimese peatükis viisime lugeja kurssi tähtsamate universumi struktuuri kirjeldavate elementidega nagu filamendid, galaktikaparved ja -grupid ning tühikud. Samuti kirjeldasime antud töös kasutatud andmeid.

Teises peatükis keskendusime filamendi telje ümber asuvate galaktikate paiknemisele piki filamendi telge. Saadi teada, et filamentide otspunktides leidub oodatust vähem galaktikaid. See on tähtis tulemus ja viitab probleemidele filamentide leidmise metoodikas, mis vajab ilmselt ülevaatamist. Edaspidises analüüsis oli tähelepanu all galaktikate vaheliste kauguste jaotus. Selleks kasutati paaris-korrelatsioonifunktsiooni, mille abil selgus, et galaktikate vahelised kaugused ei järgi ühtlase jaotusega paiknevate punktide vahelisi kaugusi. Galaktikad "eelistavad" kõige enam omada vahekaugust  $(7.5, 8]h^{-1}Mpc$ . Naabergalaktikatest võetud kauguste uurimine kinnitas samuti, et galaktikad ei paikne nagu ühtlase jaotusega punktid.

Kolmandas peatükis oli huvi all parvede peagalaktikad. Ka siin selgus, et galaktikaparvede vahelised kaugused ei jaotu nii nagu ühtlase jaotusega juhuslike punktide vahelised kaugused. Galaktikaparvi uurides selgus, et nende paiknemises ilmneb teatav perioodilisus. See tulemus on ainulaadne ning vajab edasist uurimist. Parve lähinaabrite kauguste vahelise statistilise seose uurimine kinnitas, et parvede vahelised kaugused ei jaotu telje ümber kui ühtlase jaotusega juhuslikud punktid.

Töö viimases, neljandas peatükis ehitati filamentide otste ümber  $2h^{-1}Mpc$  ja  $1h^{-1}Mpc$  kerad. Analüüsi käigus leiti nendesse keradesse sattuvad elemendid, milleks võisid olla galaktikate grupid, teiste filamentide otspunktid ja teiste

filamentide teljed (v.a. otspunktid). Tulemusena nähti, et filamentvõrgustiku moodustavad filamendid on omavahel ühendatud mitmel erisugusel moel. Oodatust väiksem galaktikagruppide paiknemine otspunktide  $1h^{-1}Mpc$  raadiuses kinnitas uuesti filamentide määramisel tekkivat viga.

Kokkuvõttes võib öelda, et filamendid kui universumi struktuurielemendid on väga keerulised süsteemid, mis võivad omavahel olla ühendatud väga erinevatel viisidel. Ilmsiks tuli ka galaktikate omavaheline eelistatud vahekaugus ning parvede eelistus paikneda perioodilise seaduspära alusel. Samal ajal nägime ka seda, et on veel reserve filamentide määramise metoodika osas. Filamentide keeruline struktuur pakub kindlasti huvitavaid uurimisprobleeme ka edaspidiseks.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Tempel, E., R. S. Stoica, V. J. Martínez, L. J. Liivamägi, G. Castellan, and E. Saar. (2013) *Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 438, p.3465-3482.
- [2] Martínez, V. J., E. Saar. (2002) *Statistics of the galaxy distribution, USA*: Chapman & Hall/CRC.
- [3] Jõeveer, M., J. Einasto. (1978) *Has the Universe the cell structure. Large scale structures in the Universe*, IAU Symposium, 79.
- [4] Aragòn-Calvo, M. A., Rien van de Weygaert, B. J. T. Jones. (2010) *Multiscale Phenomenology of the Cosmic Web*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 408, pp. 2163-2187.
- [5] Colberg, J. M., K. S. Krughoff, A. J. Connolly. (2005) *Inter-cluster filaments in the  $\Lambda$ CDM Universe*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 359, pp. 272-282.
- [6] Hoffman, Y., O. Metuki, G. Yepes, S. Gottlöber, J. E. Forero-Romero, N. I. Libeskind & A. Knebe. (2012) *Kinematic classification of the cosmic web*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 425, pp. 2049-2057.
- [7] Shu. F. H. (1982) *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy*, California: University Science Books.

- [8] Pons-Borderia, M. J., V. J. Martinez, D. Stoyan, H. Stoyan, E. Saar. (1999) *Comparing estimators of the galaxy correlation function*, Astrophysical Journal, Volume 523, pp. 480-491.
- [9] Kollo, T. (2004) *Monte Carlo meetodid*, Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Maarja Bussov,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Universumi struktuuri statistiline uurimine: filamentide, galaktikate ja galaktikaparvede vahelised seosed,

mille juhendajad on professor Kalev Pärna ja teadur Elmo Tempel,

1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

1.3 olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

1.4 kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus 19.05.2014